Iranian Journal of Field Crops Research
Homepage: https://jcesc.um.ac.ir

Research Article
Vol. 22, No. 2, Summer 2024, p. 197-210

Effects of Inoculation with Plant Growth Promoting Rhizobacteria and Nanoparticles on the Dry Matter Transfer Process and Yield Triticale (*Triticosecale Wittmack*) under Irrigation Regimes

F. Aghaei[1*], R. Seyed Sharifi[2], S. Farzaneh[3]

1- PhD Student, Department of Plant Production and Genetics, Faculty of Agriculture and Natural Resources, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran
2- Professor, Department of Plant Production and Genetics, Faculty of Agriculture and Natural Resources, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran
3- Associate Professor, Department of Plant Production and Genetics, Faculty of Agriculture and Natural Resources, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran
(*- Corresponding Author Email: f.aghaei1994@gmail.com)

Received: 27 November 2023 Revised: 16 January 2024 Accepted: 23 January 2024 Available Online: 15 May 2024	**How to cite this article:** Aghaei, F., Seyed Sharifi, R., & Farzaneh, S. (2024). Effects of Inoculation with Plant Growth Promoting Rhizobacteria and Nanoparticles on the Dry Matter Transfer Process and Yield Triticale (*Triticosecale Wittmack*) under Irrigation Regimes. *Iranian Journal of Field Crops Research*, *22*(2), 197-210. (in Persian with English abstract). https://doi.org/10.22067/jcesc.2024.85595.1280

Introduction

Among abiotic stress factors, drought is one of the most detrimental factors in arid and semiarid regions, causing a significant decrease in plant growth and yield in most species, including crops. Under drought conditions, morphological, physiological, and biochemical characteristics are negatively affected. The detrimental impact of water scarcity may be mitigated through the utilization of plant growth-promoting rhizobacteria (PGPR) and nanoparticles (NPs) like nano iron-silicon oxide. PGPR species such as Azospirillum and Pseudomonas have been found to enhance hormonal balance, maintain nutrient levels, improve plant growth characteristics, and ultimately boost yield. Additionally, the application of NPs aids in enhancing plant growth under stressful conditions by facilitating water retention, fortifying membrane integrity, and enhancing nutrient and water uptake. Consequently, it is plausible that the combined application of PGPR and NPs could enhance triticale yield even in conditions of water limitation.

Materials and Methods

An experiment as factorial split-plot was conducted based on randomized complete block design with three replications at the research farm of the Faculty of Agriculture and Natural Resources, University of Mohaghegh Ardabili in 2021. Different irrigation regimes in three levels (full irrigation as control, irrigation withholding at 50% of booting and heading stages as severe and moderate water limitation respectively (BBCH 43 and 55 codes respectively) were assigned to the main plots and the combination of bio fertilizers application in four levels (no application as control, application of *Azospirilum*, *Pseudomonas*, both application *Azospirilum* and *Pseudomonas*) and nanoparticles foliar application at four levels (foliar application with water as control, nano iron oxide foliar application (1 $g.L^{-1}$), nano silicon oxide (50 $mg.L^{-1}$), both application nano iron-silicon oxide) were assigned to the subplots. *Psedomunas* and *Azospirilum* were isolated from the rhizospheres of wheat by the Research Institute of Soil and Water, Tehran, Iran. For inoculation seeds were coated with gum Arabic as an adhesive and rolled into the suspension of bacteria until uniformly coated. The strains and cell densities of microorganisms used as PGPR in this experiment were 1×10^8 colony forming units (CFU). In each plot, there

https://doi.org/10.22067/jcesc.2024.85595.1280

were five rows with two m long. In each experimental plot, two beside rows and 0.5 m from the beginning and end of planting lines were removed as margin, and measurements were done on three rows in the middle lines. The used nano silicon-iron oxide had an average particle size of less than 30 nm and the special surface of particles was more than 30 $m^2.g^{-1}$. They were product of Nanomaterial US Research which was provided by Pishgaman Nanomaterials Company of Iran. Nano silicon oxide and nano silicon oxide powder added to deionized water and was placed on ultrasonic equipment (100 W and 40 kHz) on a shaker for better solution. Foliar application of nano silicon-iron oxide was done in two stages of period growth BBCH 21 and 30 codes respectively. In this study, dry matter remobilization, volume and root dry weight, leaf area index (LAI), and grain yield of triticale were investigated. Analysis of variance and mean comparisons were performed using SAS ver 9.1. The main effects and interactions were tested using the least significant difference (LSD) test at the 0.05 probability level.

Results and Discussion

The results showed that remobilization from the stem (22.75%) and total dry matter remobilization (21.36%) and contribution of these processes in grain yield (58.29 and 56.24% respectively) decreased in both application of PGPR and nano iron-silicon oxide foliar application under irrigation withholding at booting stage in compared to no application of bio-fertilizers and nanoparticles. Also, the application of PGPR and nanoparticles under irrigation withholding in the booting stage increased the root volume (44.68%), current photosynthesis (48.63), the contribution of photosynthesis contribution in grain yield (15.63%), LAI (32.82%), and grain yield in compared to no application of PGPR and nanoparticles under irrigation withholding at booting stage.

Conclusion

Based on the results of this study, it seems that the application of both PGPR and nanoparticles can be a suitable management factor to increase the grain yield of triticale under water-limited conditions.

Keywords: Dry matter remobilization, Full irrigation, Nano iron oxide, Nano silicon, Root volume

نشریه پژوهشهای زراعی ایران
Homepage: https://jcesc.um.ac.ir

مقاله پژوهشی

جلد ۲۲، شماره ۲، تابستان ۱٤۰۳، ص ۲۱۰-۱۹۷

تاثیر تلقیح با باکتری‌های محرک رشد و نانو ذرات بر فرآیند انتقال ماده خشک و عملکرد تریتیکاله تحت رژیم‌های آبیاری

فاطمه آقائی[1*]، رئوف سیدشریفی[2]، سلیم فرزانه[3]

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۹/۰۶
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۱۱/۰۳

چکیده

به‌منظور بررسی تاثیر باکتری‌های محرک رشد و نانو ذرات بر سهم انتقال ماده خشک و فتوسنتز جاری در عملکرد دانه تریتیکاله در رژیم‌های مختلف آبیاری، آزمایشی به‌صورت اسپلیت‌پلات فاکتوریل در قالب طرح پایه بلوک‌های کامل تصادفی در سه تکرار در مزرعه تحقیقاتی دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه محقق اردبیلی در سال ۱۴۰۰ اجرا شد. رژیم‌های مختلف آبیاری در سه سطح (آبیاری کامل به‌عنوان شاهد، قطع آبیاری در ۵۰ درصد مراحل آبستنی و سنبله‌دهی به‌ترتیب به‌عنوان محدودیت شدید و ملایم آبی معادل کد ۴۳ و ۵۵ مقیاس BBCH) در کرت‌های اصلی قرار داده شدند و ترکیبی از کاربرد کودهای زیستی در چهار سطح (عدم کاربرد به‌عنوان شاهد، کاربرد *آزوسپریلوم*، *سودوموناس* و کاربرد توام *آزوسپریلوم* و *سودوموناس*) و محلول‌پاشی نانوذرات در چهار سطح (محلول‌پاشی با آب به‌عنوان شاهد، محلول‌پاشی یک گرم در لیتر نانو اکسید آهن، محلول‌پاشی ۵۰ میلی‌گرم در لیتر نانوسیلیکون و محلول‌پاشی توام نانواکسید آهن و نانوسیلیکون) به‌صورت فاکتوریل در کرت‌های فرعی قرار داده شدند. نتایج نشان داد که مصرف توام باکتری‌های محرک رشد و نانوذرات در شرایط قطع آبیاری در مرحله آبستنی، موجب کاهش درصد انتقال ماده خشک از ساقه (۲۲/۷۵٪) و اندام هوایی (۲۱/۳۶٪) و سهم این فرآیندها در عملکرد دانه (به‌ترتیب ۵۸/۲۹ و ۵۶/۲۴٪) نسبت به شرایط عدم کاربرد باکتری‌های محرک رشد و نانوذرات در همین سطح از سطوح آبیاری شد. همچنین کاربرد توام باکتری‌های محرک رشد در شرایط قطع آبیاری در مرحله آبستنی، حجم ریشه (۴۴/۶۸٪)، فتوسنتز جاری (۴۸/۶۳٪)، سهم فتوسنتز جاری در عملکرد دانه (۱۵/۶۳٪)، شاخص سطح برگ (۳۲/۸۲٪) و عملکرد دانه (۲۸/۵۸٪) را نسبت به عدم کاربرد باکتری‌های محرک رشد و نانوذرات تحت شرایط قطع آبیاری در مرحله آبستنی افزایش داد. براساس نتایج این آزمایش به‌نظر می‌رسد کاربرد باکتری‌های محرک رشد و نانوذرات می‌تواند به‌عنوان یک فاکتور مدیریتی مناسب برای افزایش عملکرد تریتیکاله در شرایط محدودیت آبی مدنظر باشد.

واژه‌های کلیدی: آبیاری کامل، انتقال ماده خشک، حجم ریشه، نانواکسید آهن و نانوسیلیکون

مقدمه

تنش‌های زیستی و غیرزیستی از جمله مهم‌ترین دلایل کاهش عملکرد و کمبود مواد غذایی در سراسر جهان هستند. تقاضای آب آبیاری ممکن است تا سال ۲۰۵۰ به دلیل نوسانات دما، تا ۱۰ درصد افزایش یابد از این رو خشکسالی یکی از مضرترین عوامل در مناطق خشک و نیمه‌خشک است که موجب کاهش قابل‌توجه رشد و عملکرد گیاه در اکثر گونه‌ها از جمله محصولات زراعی می‌شود (Ur Rehman *et al*., 2022). خشکی تولید اتیلن را از طریق افزایش سطوح ۱-آمینو سیکلوپروپان-۱- کربوکسیلیک اسید (یا ACC دآمیناز به‌عنوان پیش‌ماده بیوسنتز اتیلن) تحریک می‌کند (Yuan, Zu, Sun, & Zuo, 2022). اتیلن موجب فتوسنتز ناکافی، دریافت کمتر مواد مغذی و کاهش ذخیره آب شده و با ایجاد محدودیت در رشد، عملکرد محصول را کاهش می‌دهد (Brunetti *et al*., 2021). خشکی با مهار فرآیندهای مختلف مورفولوژیکی، فیزیولوژیکی و بیوشیمیایی مانند کاهش فعالیت روبیسکو و میزان رنگدانه‌های فتوسنتزی، محدود کردن ورودی CO_2 به برگ یا تغییر در فتوسنتز،

۱- دانشجوی دکتری گروه مهندسی تولید و ژنتیک گیاهی، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران
۲ و ۳- به‌ترتیب استاد و دانشیار گروه مهندسی تولید و ژنتیک گیاهی، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران
(*- نویسنده مسئول: Email: f.aghaei1994@gmail.com)
https://doi.org/10.22067/jcesc.2024.85595.1280

متابولیسم مواد مغذی و جذب یون، سنتز کربوهیدرات و سرعت تثبیت کربن را، کاهش می‌دهد (Kapoor *et al.*, 2020). نریمانی و همکاران (Narimani, Seyed Sharifi, & Sedghi, 2022) گزارش کردند که محدودیت آبی با تسریع پیری گیاه تریتیکاله (*Triticosecale Wittmack*)، سهم فرآیند انتقال مجدد از اندام‌های هوایی به دانه را افزایش داد.

یکی از راه‌کارهای مناسب برای مقابله با اثرات نامطلوب خشکی، استفاده از میکروارگانیسم‌های مفید مانند ریزوباکتری‌های محرک رشد گیاه (PGPR[1]) است که یک روش سازگار با محیط‌زیست برای بهبود رشد و بهره‌وری گیاهان بوده (Chieb & Gachomo, 2023) و ضمن تاثیر بر فرآیندهای فیزیولوژیکی، بیوشیمیایی، مولکولی در بهبود خصوصیات رشدی گیاه و افزایش عملکرد موثر است (Abdelaal *et al.*, 2021). کاربرد این باکتری‌ها با کاهش pH و افزایش فسفر قابل‌دسترس، فسفاتازهای اسیدی و قلیایی، در افزایش کارایی کودهای نیتروژن و فسفر و بهبود رشد گیاهان زراعی موثراست (Saleemi, Kiani, Sultan, Khalid, & Mahmood, 2017). محمدی کله‌سرلو و همکاران (Mohammadi Kale Sarlou, Seyed Sharifi, Narimani, & Nazari, 2023) اظهار داشتند که کودهای زیستی با بهبود شاخص سطح برگ و وزن و حجم ریشه، موجب افزایش فتوسنتز جاری و سهم این فرآیند در عملکرد دانه تریتیکاله در شرایط تنش شد.

یکی دیگر از راهکارهای موثر در افزایش مقاومت گیاهان در برابر تنش‌های زیستی و غیرزیستی استفاده از نانوذرات است. کاربرد نانوذرات با محافظت از غشاها و دستگاه فتوسنتزی، حفظ روابط آبی و تجمع اسمولیت‌ها، افزایش جذب مواد مغذی و آب، ضمن افزایش قابل‌ملاحظه رشد گیاه در شرایط تنش، موجب مقاومت بهتر در برابر تنش می‌شود (Rasheed *et al.*, 2022). کاربرد سیلیکون (Si) یک رویکرد جدید و موثر در تعدیل اثرات ناشی از تنش خشکی است که ضمن افزایش قابل‌توجه استحکام مکانیکی و پایداری غشاء سلولی، کمک به پایداری و محافظت گیاه (Rajput *et al.*, 2021)، به بهبود تغذیه معدنی، کارایی فتوسنتزی و سیستم دفاعی گیاه کمک کرده (Desoky, Mansour, Yasin, El Sobky, & Rady, 2020) و در کاهش اثرات منفی ناشی از کمبود آب و بهبود رشد و عملکرد گیاه مفید است (Rady, Elrys, El-Maati, & Desoky, 2019). نظری و همکاران (Nazari, Sedgi, & Narimani, 2022) گزارش کردند که محلول‌پاشی نانوسیلیکون در شرایط خشکی، از طریق بهبود شاخص سطح برگ و فتوسنتز جاری، موجب افزایش عملکرد دانه تریتیکاله شد.

آهن نیز یک از عناصر ریزمغذی ضروری و موثر در تنظیم رشد و نمو گیاهان بوده و در بسیاری از فرآیندهای متابولیسم و بیوسنتز کلروفیل، فتوسنتز و تنفس نقش دارد (Rizwan *et al.*, 2019). جذب آهن در گیاهان تحت تنش، به شدت کاهش می‌یابد. از این‌رو کاربرد آن به‌خصوص به شکل نانو آهن در اشکال مختلف (چون Fe, FeO, Fe_2O_3, Fe_3O_4) در شرایط تنش ممکن است راهی موثر در کاهش علائم کمبود آهن و بهبود عملکرد گیاهان باشد (Kreslavskia *et al.*, 2023). نظری و همکاران (Nazari *et al.*, 2022) در بررسی تاثیر محلول‌پاشی نانواکسید آهن و نانوسیلیکون بر عملکرد دانه گندم تحت شرایط تنش، بهبود فتوسنتز جاری و سهم این فرآیند در عملکرد دانه را، از علل اصلی کاهش انتقال ماده خشک از ساقه و اندام هوایی تحت چنین شرایطی عنوان نمودند.

با توجه به اثر محدودیت آبی در مراحل مختلف رشد زایشی در تسریع پیری و کاهش فتوسنتز جاری و از طرفی به دلیل نقش باکتری‌های محرک رشد و نانوذرات (نانوسیلیکون و نانواکسید آهن) در کاهش یا تعدیل بخشی از اثرات ناشی از محدودیت آبی و بررسی‌های محدود انجام‌شده درخصوص برهمکنش این عوامل، موجب شد تا مطالعه حاضر با هدف بررسی تاثیر باکتری‌های محرک رشد و نانوذرات بر سهم فرآیند انتقال مجدد ماده خشک و فتوسنتز جاری در عملکرد دانه در رژیم‌های مختلف آبیاری تحت شرایط اقلیمی اردبیل مورد ارزیابی قرار گیرد.

مواد و روش‌ها

آزمایش به‌صورت اسپلیت‌پلات فاکتوریل در قالب طرح پایه بلوک‌های کامل تصادفی در سه تکرار در مزرعه تحقیقاتی دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه محقق اردبیلی با مختصات جغرافیایی ۳۸ درجه و ۱۵ دقیقه عرض شمالی و ۴۸ درجه و ۲۰ دقیقه طول شرقی و ارتفاع ۱۳۵۰ متر از سطح دریا در سال ۱۴۰۰ اجرا شد (Kheirizadeh Arough, 2016). محل اجرای آزمایش دارای اقلیم نیمه‌خشک و سرد است (Narimani, Seyed Sharifi, Khalilzadeh, & Aminzadeh, 2019). نتایج حاصل از تجزیه خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک مزرعه آزمایشی در جدول ۱ آورده شده است.

عوامل مورد بررسی شامل رژیم‌های مختلف آبیاری در سه سطح (آبیاری کامل در طول دوره رشدی به‌عنوان شاهد، قطع آبیاری در ۵۰ درصد مراحل چکمه‌ای شدن (آبستنی) و سنبله‌دهی به‌ترتیب به‌عنوان محدودیت شدید و ملایم آبی بر اساس کد ۴۳ و ۵۵ مقیاس BBCH) در کرت‌های اصلی، ترکیبی از کاربرد کودهای زیستی در چهار سطح [عدم کاربرد به‌عنوان شاهد، کاربرد *آزوسپریلوم* لیپوفروم استرین OF (*Azospirillum lipoferum* strain OF)، *سودوموناس* پوتیدا سویه ۴ (*Psedomunas putida* strains 4)، کاربرد توام *آزوسپریلوم* و

1- Plant growth-promoting rhizobacteria

سودوموناس] و محلول‌پاشی نانوذرات در چهار سطح (محلول‌پاشی با آب به‌عنوان شاهد، محلول‌پاشی یک گرم در لیتر نانو اکسیدآهن، محلول‌پاشی ۵۰ میلی‌گرم در لیتر نانوسیلیکون، محلول‌پاشی توام نانواکسیدآهن و سیلیکون) به‌صورت فاکتوریل در کرت‌های فرعی قرار داده شدند. سویه خالص باکتری‌های محرک رشد از موسسه خاک و آب تهران تهیه شد. نانواکسید آهن از موسسه تجهیزات آزمایشگاهی و شیمیایی جهان کیمیای ارومیه و نانوسیلیکون (SiO_2-Nano) محصول شرکت Nanomaterial US Research بود که از شرکت پیشگامان نانو مواد ایرانیان تهیه و مشخصات آن‌ها در جدول ۲ آورده شده است.

جدول ۱- مشخصات فیزیکو شیمیایی خاک
Table 1- Soil physico-chemical characteristics

ویژگی Characteristic	روی Zn	پتاسیم K	فسفر P	نیتروژن کل N	کربن آلی O. C	شن Sand	سیلت Silt	رس Clay	آهک $CaCO_3$	درصد عصاره اشباع Saturated extract	بافت Texture	pH
مقادیر	mg kg^{-1}					٪						
Amount	1.8	212	8.29	0.06	0.62	35	42	23	14.4	49	Loamy	7.8

جدول ۲- مشخصات نانواکسید آهن و نانوسیلیکون
Table 2- Nano iron-silicon oxide properties

رنگ Color	سطح ویژه ذرات Specific surface area of particles	میانگین اندازه ذرات Average particle size (nm)	خلوص Purity (%)	وزن Weight (g)	نوع نانوذرات Type of nanoparticles
پودری قرمز Red powder	>30 m^2.g^{-1}	<30	99	25	نانواکسید آهن Nano iron oxide
پودری سفید White powder	>30 m^2.g^{-1}	20-30	99	50	نانوسیلیکون Nano silicon

جدول ۳- مشخصات جوی در طول دوره رشدی تریتیکاله
Table 3- Atmospheric characteristics during triticale growth

پارامتر Parameter	فروردین Apr	اردیبهشت May	خرداد Jun	تیر Jul	مرداد Aug
بارندگی ماهیانه Rainfall (mm)	5.5	16.8	6.3	3.5	3.5
میانگین دما Average temperature (°C)	10.6	15.0	19.2	21.3	21.3
متوسط رطوبت نسبی Mean of relative humidity (%)	63	72	63	58	58
مجموع ساعات آفتابی Total hours of sunshine (h)	226.7	248.2	316.1	309	309

برای تلقیح بذر با باکتری‌های *آزوسپریلوم* و *سودوموناس*، از مایه تلقیحی که هر گرم آن دارای ۱۰^۸ عدد باکتری زنده و فعال بود به‌همراه محلول صمغ عربی برای چسبندگی بهتر مایه تلقیح به بذرها استفاده شد. این مخلوط به مدت دو ساعت در محل خشک و تاریک قرار داده شد. محلول‌پاشی نانواکسید آهن و سیلیکون در دو مرحله از دوره رشد رویشی (مراحل پنجه‌دهی و ساقه‌دهی به‌ترتیب معادل با کد ۲۱ و ۳۰ از مقیاس BBCH[1]) انجام شد. تاریخ کاشت در ۱۵ اردیبهشت و برداشت ۳۱ مرداد ۱۴۰۰ بود. اولین آبیاری بعد از کاشت و آبیاری‌های بعدی بسته به شرایط محیطی، نیاز گیاه زراعی و سطوح تیمار کم‌آبیاری انجام شد. هر واحد آزمایشی شامل پنج خط کاشت به طول دو متر با فاصله بین ردیفی ۲۰ سانتی‌متر و تراکم ۳۸۰ بذر در مترمربع (که تراکم مطلوب و توصیه‌شده رقم سناباد است، این رقم متوسطرس، با ارتفاع بوته ۱۱۰-۱۲۰ سانتی‌وزن و وزن هزار دانه آن به‌طور متوسط ۴۵/۴۷ گرم می‌باشد که نسبت به خوابیدگی مقاوم است) بود. مشخصات جوی در طول دوره رشدی در جدول ۳ آورده شده است.

بررسی شاخص سطح برگ (LAI) از رابطه (۱) برآورد شد (Seyed Sharifi & Gholinejad, 2021).

1- Biologische Bubdesanstalt, Bundessorttenamt and Chemical industry

$$LAI = e^{(a+bt+ct^2)} \qquad (۱)$$

در این رابطه، t زمان بین مراحل نمونه‌برداری و a، b و c ضرایب معادله هستند.

به‌منظور برآورد میزان انتقال مجدد مواد از اندام‌های رویشی به دانه، نمونه‌برداری از زمان پرشدن دانه تا مرحله رسیدگی فیزیولوژیک انجام شد (Seyed Sharifi & Gholinejad, 2021). بدین‌ترتیب که در این مرحله هر چهار روز یک‌بار، ده سانتی‌متر از خطوط اصلی هر کرت بارعایت اثر حاشیه‌ای انتخاب شد. بوته‌های برداشت‌شده به ساقه، برگ و سنبله تفکیک شدند. پس از خشک کردن (قراردادن در آون با دمای ۷۵ درجه سانتی‌گراد به مدت ۴۸ ساعت) به اندام‌های مختلف توزین و میزان انتقال ماده خشک، سهم فرآیند انتقال مجدد از بخش رویشی به دانه و میزان مشارکت ذخایر ساقه در عملکرد دانه با استفاده از روابط (۲) تا (۷) محاسبه شدند (Barnett & Pearce, 1983).

$$DMT = DMA - DMM \qquad (۲)$$

که در آن DMT[1] میزان انتقال ماده خشک کل بر حسب گرم در مترمربع، DMA[2] حداکثر میزان ماده خشک اندام هوایی در برداشت اول و DMM[3] میزان ماده خشک اندام هوایی (به‌جز دانه) در مرحله رسیدگی فیزیولوژیک است.

$$CDMAG = \left(\frac{DMT}{GY}\right) \times 100 \qquad (۳)$$

در این رابطه CDMAG[4] سهم فرآیند انتقال مجدد ماده خشک کل در تشکیل دانه بر حسب درصد، DMT میزان انتقال ماده خشک بر حسب گرم در مترمربع و GY[5] عملکرد دانه بر حسب گرم در مترمربع می‌باشد.

$$SDMT = SDMM - SDMA \qquad (۴)$$

در این رابطه SDMT[6] میزان انتقال ماده خشک از ساقه بر حسب گرم در مترمربع، SDMA[7] حداکثر وزن خشک ساقه در برداشت اول، SDMM[8] وزن خشک ساقه در مرحله رسیدگی فیزیولوژیک می‌باشد.

$$CSAG = \left(\frac{SDMT}{GY}\right) \times 100 \qquad (۵)$$

در این رابطه CSAG[9] سهم ذخایر ساقه در عملکرد دانه بر حسب درصد، SDMT میزان انتقال ماده خشک از ساقه بر حسب گرم در مترمربع و GY عملکرد دانه بر حسب گرم در مترمربع می‌باشد.

$$CP = GY - DMT \qquad (۶)$$

در این رابطه CP[10] میزان فتوسنتز جاری برحسب گرم در مترمربع، GY عملکرد دانه بر حسب گرم در مترمربع و DMT میزان انتقال ماده خشک بر حسب گرم در مترمربع می‌باشد.

$$SSPG = \left(\frac{CP}{GY}\right) \times 100 \qquad (۷)$$

در این CCPG[11] سهم نسبی فتوسنتز جاری در دانه بر حسب درصد، CP میزان فتوسنتز جاری بر حسب گرم در مترمربع و GY عملکرد دانه بر حسب گرم در مترمربع می‌باشد.

به‌منظور اندازه‌گیری وزن و حجم ریشه، قبل از کاشت در ردیف‌های اصلی هر واحد آزمایشی، تعدادی کیسه‌های پلاستیکی به قطر ۴۰ سانتی‌متر در عمق ۴۰ سانتی‌متری خاک و هم سطح با دیگر خطوط کاشت قرار داده شد. تراکم کاشت در این کیسه‌ها مشابه تراکم دیگر قسمت‌های کاشته‌شده در نظر گرفته شد. بعد از برداشت بوته‌ها، برای اندازه‌گیری وزن و حجم ریشه، نسبت به خارج‌سازی ریشه‌ها از این کیسه‌ها اقدام شد. ریشه‌ها برای خشک شدن در آون با دمای ۷۵ درجه سانتی‌گراد به مدت ۷۲ ساعت یا بیشتر (تا زمان تثبیت وزن خشک نهایی) قرار داده شد و سپس وزن خشک ریشه با ترازوی دیجیتالی با دقت ۰/۰۰۱ گرم توزین شد. حجم ریشه با استفاده از حجم مشخصی از آب در استوانه مدرج اندازه‌گیری شد طوری‌که اختلاف حجم ایجادشده پس از ورود ریشه‌ها در آب استوانه مدرج به‌عنوان حجم ریشه منظور شد. عملکرد دانه از سطحی معادل ۰/۲ مترمربع از خطوط اصلی هر کرت بعد از حذف اثر حاشیه‌ای برآورد شد. تجزیه داده‌ها و رسم نمودارها با استفاده از نرم‌افزارهای $SAS_{9.1}$ و Excel و مقایسه میانگین‌ها با آزمون LSD در سطح احتمال پنج درصد انجام شدند.

نتایج و بحث

میزان انتقال ماده خشک و سهم این فرآیند در عملکرد دانه

نتایج تجزیه واریانس نشان داد اثر سطوح آبیاری، باکتری‌های محرک رشد و نانوذرات (نانواکسید آهن و سیلیکون) بر میزان انتقال ماده خشک از ساقه و اندام هوایی و سهم این فرآیندها در عملکرد دانه در سطح احتمال یک و پنج درصد معنی‌دار شد (جدول ۴). نتایج نشان داد که کاربرد توأم باکتری‌های محرک رشد و نانوذرات در شرایط آبیاری کامل از کم‌ترین میزان انتقال ماده از اندام هوایی و ساقه (۹۴/۶۴ و ۷۶/۳۴ گرم در مترمربع) برخوردار بوده و از کاهش ۳۴/۹۳ و ۳۶/۹ درصدی سهم این فرآیندها در عملکرد دانه نسبت به

1- Dry Matter Translocation
2- Dry Matter at Anthesis
3- Dry Matter at Maturity
4- Contribution of Dry Matter Assimilates to Grain
5- Grain Yield
6- Stem Dry Matter Translocation
7- Stem Dry Matter at Anthesis
8- Stem Dry Matter at Maturity
9- Contribution of Stem Assimilates to Grain

10- Current photosynthesis
11- Contribution Current photosynthesis in grain

شرایط عدم مصرف باکتری‌های محرک رشد و نانوذرات تحت شرایط قطع آبیاری در مرحله آبستنی برخوردار بود (جدول ۵). به نظر می‌رسد افزایش انتقال ماده خشک در شرایط محدودیت شدید آبی، به دلیل افزایش تقاضای دانه‌های تشکیل‌شده به مواد فتوسنتزی و کاهش سهم فتوسنتز جاری در برآورد این نیاز مخازن (دانه‌ها) باشد. دیگر محققان نیز اظهار داشتند که در شرایط محدودیت آبی، میزان انتقال ماده خشک گندم نسبت به آبیاری کامل افزایش یافت و گزارش کردند که به هنگام وقوع خشکی در مرحله ساقه‌روی تا گلدهی، بخش بیشتری از مواد فتوسنتزی به دانه‌ها انتقال یافته و موجب افزایش انتقال ماده خشک در این مرحله می‌شود (Liu *et al.*, 2020). به نظر می‌رسد بخشی از افزایش انتقال ماده خشک در شرایط محدودیت آبی می‌تواند ناشی از اثر شرایط تنش در کاهش شاخص سطح برگ (جدول ۷) و به تبع از آن کاهش فتوسنتز جاری (جدول ۵) باشد. در چنین شرایطی به دلیل عدم توانایی منبع در تامین نیاز مخزن موجب می‌شود که میزان انتقال ماده خشک افزایش یابد تا لااقل بتواند بخشی از نیاز مخازن را برآورده نماید. نتایج مشابهی نیز توسط دیگر محققان مبنی بر این‌که در شرایط بروز تنش شوری و محدودیت آبی کاهش شاخص سطح برگ و در نتیجه کاهش فتوسنتز جاری در گیاه، موجب افزایش انتقال مجدد ماده خشک و سهم این فرآیند در عملکرد دانه می‌شود توسط دیگر محققان گزارش شده است (Narimani *et al.*, 2022; Nazari *et al.*, 2022).

در شرایط تلقیح بذر با باکتری‌های محرک رشد با افزایش شاخص سطح برگ و متعاقب آن افزایش فتوسنتز و مواد ذخیره‌ای در گیاه بالا می‌رود. در چنین شرایطی منبع قادر به تامین ظرفیت مخزن بوده و موجب می‌شود بخش عمده‌ای از ذخایر دانه توسط فتوسنتز جاری تامین شده و در نتیجه سهم فرآیند انتقال ماده خشک در عملکرد دانه کاهش یابد (Abbasi, Mehri, Solimanzadeha, & Alipourb, 2021)، که با نتایج این پژوهش همخوانی دارد.

بخش دیگری از کاهش انتقال ماده خشک از ساقه و اندام هوایی و سهم این فرآیندها در عملکرد دانه به‌واسطه محلول‌پاشی نانواکسید آهن و نانوسیلیکون را می‌توان به اثر این نانوذرات بر بهبود فتوسنتز جاری نسبت داد. در این راستا نظری و همکاران (Nazari *et al.*, 2022) بیان کردند که محلول‌پاشی نانواکسید آهن و نانوسیلیکون با بهبود فتوسنتز جاری و سهم این فرآیند در عملکرد دانه، موجب کاهش انتقال ماده خشک از ساقه و اندام هوایی و سهم این فرآیندها در عملکرد دانه گندم شد. رضابیگی و همکاران (Rezabeighi, Bijanzadeh, & Behpouri, 2020) ضمن گزارش افزایش میزان انتقال ماده خشک تحت شرایط تنش خشکی، اظهار داشتند کاربرد سیلیکون تحت شرایط آبیاری مطلوب با بهبود مکانیسم جذب، تجمع و انتقال بهتر مواد کربوهیدراتی به دانه، موجب کاهش انتقال ماده خشک در گندم شد. در این پژوهش نیز احتمالاً کاربرد توأم باکتری‌های محرک رشد و نانوذرات با افزایش حجم و وزن خشک ریشه (جدول ۷ و جدول ۸)، شاخص سطح برگ (جدول ۷) و تعدیل اثر ناشی از محدودیت آبی و بهبود سهم فتوسنتز جاری در عملکرد دانه (جدول ۵)، موجب شده است بخش عمده‌ای از عملکرد دانه توسط فتوسنتز جاری تأمین شده و بخش کمتری به انتقال ماده خشک و سهم این فرآیند در عملکرد دانه تخصیص داده شود (جدول ۵).

میزان فتوسنتز جاری و سهم این فرآیند در عملکرد دانه

نتایج تجزیه واریانس نشان داد اثر سطوح آبیاری، باکتری‌های محرک رشد و نانوذرات (نانواکسید آهن ونانوسیلیکون) و همچنین برهمکنش این عوامل بر میزان فتوسنتز جاری و سهم این فرآیند در عملکرد دانه در سطح احتمال پنج و یک درصد معنی‌دار شد (جدول ۴). براساس نتایج مقایسه میانگین‌ها، کاربرد باکتری‌های محرک رشد و نانوذرات در شرایط قطع آبیاری در مرحله آبستنی از بیشترین فتوسنتز جاری و سهم این فرآیند در عملکرد دانه (به‌ترتیب ۴۳۷/۴۹ گرم در مترمربع و ۸۰/۶۱ درصد) و از افزایش ۴۸/۶۳ و ۱۵/۶۳ درصدی این صفات نسبت به عدم کاربرد باکتری‌های محرک رشد و نانوذرات تحت شرایط همین سطح از سطوح آبیاری برخوردار بود (جدول ۵). عبادی و همکاران (Ebadi, Seyed Sharifi, & Narimani, 2020) بیان داشتند در شرایط بهینه، فتوسنتز جاری بیش‌ترین سهم را در وزن دانه‌ی جو دارد، ولی در شرایط محدودیت آبی، سهم فرآیند انتقال مجدد به دانه‌ها افزایش می‌یابد تا ضمن تعدیل اثر منفی ناشی از تنش خشکی بر میزان فتوسنتزی جاری، بخشی از کاهش عملکرد دانه از طریق افزایش سهم انتقال مجدد جبران شود. در مطالعه حاضر، کاربرد باکتری‌های محرک رشد و نانوذرات و آبیاری کامل از بیشترین میزان فتوسنتز جاری و از حداقل میزان انتقال مجدد ماده خشک برخوردار بود. بخشی از بالا بودن فتوسنتز جاری را می‌توان به تأثیر مثبت باکتری‌های محرک رشد و نانوذرات بر افزایش شاخص سطح برگ (جدول ۷) و افزایش سهم فتوسنتز جاری نسبت داد. در این راستا محمدی کله‌سرلو و همکاران (Mohammadi Kale Sarlou *et al.*, 2023) نیز گزارش کردند که کاربرد باکتری‌های محرک رشد با افزایش شاخص سطح برگ، به دلیل افزایش سهم فتوسنتز جاری موجب شد تا سهم فرآیند انتقال مجدد در عملکرد دانه گندم کاهش یابد. نظری و همکاران (Nazari *et al.*, 2022) اظهار داشتند که محلول‌پاشی نانوسیلیکون و نانواکسید آهن با بهبود وزن و حجم ریشه و شاخص سطح برگ، موجب افزایش فتوسنتز جاری و سهم این فرآیند در عملکرد دانه شد. احتمالا کاربرد نانوذرات موجب افزایش مواد مغذی در گیاهان می‌شود و در نتیجه فتوسنتز را بهبود می‌بخشد. علاوه بر این، نانوسیلیکون ضخامت دیواره سلولی را افزایش داده و انتقال مواد مغذی را که یکی از دلایل

اصلی افزایش سرعت فتوسنتز است افزایش می‌دهد (Khan *et al.*, 2020).

شاخص سطح برگ

نتایج تجزیه واریانس نشان داد اثر سطوح آبیاری، باکتری‌های محرک رشد و نانوذرات (نانواکسید آهن و نانوسیلیکون) بر شاخص سطح برگ در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار شد (جدول ۶). مقایسه میانگین‌ها نشان داد که حداقل شاخص سطح برگ در حالت عدم کاربرد باکتری‌های محرک رشد و نانوذرات در شرایط قطع آبیاری در مرحله آبستنی و بیشترین آن در کاربرد توأم باکتری‌های محرک رشد و نانوذرات در شرایط آبیاری کامل به‌دست آمد (جدول ۸). به عبارتی کاربرد توام باکتری‌های محرک رشد و نانوذرات در شرایط قطع آبیاری در مرحله آبستنی منجر به افزایش ۳۲/۸۲ درصدی سطح برگ نسبت به عدم کاربرد باکتری‌های محرک رشد و نانوذرات در این سطح از آبیاری شد (جدول ۸). محدودیت آبی به دلیل کاهش جذب آب توسط گیاه، منجر به کاهش تقسیم و بزرگ شدن سلول‌ها شده (Safi, Moshatati, Gharineh, & Khodaei Joghan, 2022) و به تبع از آن سطح برگ و فتوسنتز را کاهش می‌دهد. ولی کاربرد توأم باکتری‌های محرک رشد و نانوذرات در شرایط آبیاری کامل به دلیل افزایش شاخص سطح برگ موجب افزایش فتوسنتز و سهم این فرآیند در عملکرد دانه می‌شود.

بخشی دیگری از افزایش شاخص سطح برگ به‌واسطه محلول‌پاشی نانوذرات را می‌توان به افزایش وزن (جدول ۸) و حجم ریشه (جدول ۷) و بهبود فتوسنتز جاری نسبت داد (جدول ۵). نظری و همکاران (Nazari *et al.*, 2022) اظهار داشتند کاربرد نانوذرات (نانواکسید آهن و سیلیکون) تحت شرایط تنش از طریق بهبود میزان فتوسنتز و افزایش شاخص سطح برگ (جدول ۶)، موجب افزایش سهم فرآیند فتوسنتزی در عملکرد دانه شد که با یافته‌های محمدی کله‌سرلو و همکاران (Mohammadi Kale Sarlou *et al.*, 2023) مطابقت دارد.

جدول ٤- تجزیه واریانس تاثیر باکتری‌های محرک رشد و نانوذرات بر انتقال ماده خشک تریتیکاله در سطوح مختلف آبیاری

Table 4- Analysis of variance of the effects of PGPR and nanoparticles on dry matter remobilization of triticale under different levels of irrigation

منابع تغییرات Source of variation	درجه آزادی d.f	میانگین مربعات (Mean Square)					
		انتقال ماده خشک کل DMT	سهم فرآیند انتقال مجدد درعملکرد دانه CDMAG	میزان انتقال مجدد از ساقه SDMT	سهم ذخایر ساقه در عملکرد دانه CSAG	میزان فتوسنتز جاری CP	سهم فتوسنتز جاری در عملکرد دانه SSPG
تکرار (R) Replication	2	3856.57**	113.44**	445.96**	34.99**	12725.12**	170.69**
آبیاری Irrigation (I)	2	2462.12**	511**	1508.82**	356.79**	144292**	154.84**
Error a خطای اصلی	4	127.55	6.55	37.91	4.15	1909.15	45.17
کودهای زیستی Bio fertilizers (B)	3	542.02**	104.31**	273.39**	61.28**	24136.41**	70.28**
نانوذرات nanoparticles (N)	3	511.21**	75.63**	424.88**	64.1**	18896.53**	57.16**
I×B	6	68.23*	4.77*	46.46*	3.89**	485.87ns	21.87*
I×N	6	45.78ns	3.14ns	36.02ns	2.09ns	392.41ns	24.85*
B×N	9	122.9**	6**	105.19**	4.67**	602.76*	16.1ns
I×B×N	18	64.87**	4.13**	53.38**	2.71**	538.89*	28.77**
خطای فرعی Error b	90	30.67	1.95	18.92	1.09	304.88	10.28
ضریب تغییرات CV (%)		5.0	6.5	4.8	5.9	4.2	4.1

ns، * و ** به‌ترتیب غیر معنی‌دار و معنی‌دار در سطح احتمال پنج و یک درصد.

ns, * and ** are non-significant, significant at P≤0.05 and P≤0.01, respectively.

جدول ۵- مقایسه میانگین تاثیر باکتری‌های محرک رشد و نانوذرات بر انتقال ماده خشک تریتیکاله در سطوح مختلف آبیاری

Table 5- Means comparison of the effects of PGPR and nanoparticles on dry matter remobilization of triticale under different levels of irrigation

ترکیب تیماری Treatments	میزان انتقال ماده خشک کل ($g.m^{-2}$) DMT	سهم فرآیند انتقال مجدد درعملکرد دانه (٪)CDMAG	میزان انتقال ماده خشک از ساقه ($g.m^{-2}$) SDMT	سهم ذخایر ساقه در عملکرد دانه (٪) CSAG	فتوسنتز جاری CP ($g.m^{-2}$)	سهم نسبی فتوسنتز جاری در عملکرد دانه (٪)SSPG
$I_0 \times B_0 \times N_0$	114.64^{d-m}	21.67^{h-n}	93.07^{d-j}	17.61^{i-l}	414.16^{k-o}	78.32^{l-r}
$I_0 \times B_1 \times N_0$	108.6^{j-q}	19.23^{o-v}	86.95^{i-n}	15.39^{o-r}	455.98^{d-i}	80.76^{d-k}
$I_0 \times B_2 \times N_0$	101.71^{p-t}	18.85^{q-w}	83.37^{l-q}	15.46^{o-r}	437.64^{h-k}	81.14^{c-i}
$I_0 \times B_3 \times N_0$	116.1^{c-k}	20.38^{k-s}	95.64^{c-g}	16.79^{j-o}	454^{e-i}	79.61^{g-o}
$I_0 \times B_0 \times N_1$	110.83^{g-p}	20.13^{l-s}	90.2^{f-l}	16.39^{k-o}	439.42^{g-k}	79.86^{g-n}
$I_0 \times B_1 \times N_1$	99.89^{q-t}	17.03^{v-y}	82.25^{m-q}	14.03^{r-t}	486.1^{a-c}	82.96^{a-d}
$I_0 \times B_2 \times N_1$	99.6^{q-t}	17.21^{u-y}	81^{n-q}	13.99^{r-t}	478.95^{a-f}	82.79^{a-e}
$I_0 \times B_3 \times N_1$	97.58^{r-t}	16.56^{w-y}	78.88^{pq}	13.39^{st}	491.23^{a-c}	83.43^{a-c}
$I_0 \times B_0 \times N_2$	104.89^{n-s}	20.41^{k-r}	84.88^{k-p}	16.53^{k-o}	414.15^{k-o}	79.58^{a-c}
$I_0 \times B_1 \times N_2$	96.7^{st}	17.05^{v-y}	79.07^{pq}	13.95^{r-t}	470.07^{b-g}	82.94^{a-d}
$I_0 \times B_2 \times N_2$	115.43^{c-l}	19.81^{m-s}	96.27^{b-g}	16.52^{k-o}	467.72^{c-h}	80.19^{g-m}
$I_0 \times B_3 \times N_2$	96.14^{st}	16.18^{xy}	78.09^{pq}	13.14^{st}	497.62^{a-c}	83.81^{ab}
$I_0 \times B_0 \times N_3$	103.5^{o-t}	18.04^{r-x}	83.27^{l-q}	14.52^{p-s}	469.79^{c-g}	81.95^{b-h}
$I_0 \times B_1 \times N_3$	95.78^{st}	16.03^{xy}	77.6^{q}	12.99^{st}	501.18^{ab}	83.96^{ab}
$I_0 \times B_2 \times N_3$	97.49^{r-t}	18.03^{s-x}	79.51^{o-q}	13.46^{st}	484.02^{a-e}	81.96^{ab}
$I_0 \times B_3 \times N_3$	94.64^{t}	16.64^{y}	76.34^{q}	12.62^{t}	510.09^{a}	84.35^{a}
$I_1 \times B_0 \times N_0$	123.23^{a-d}	26.23^{b}	99.65^{a-d}	21.24^{c-e}	347.5^{s-v}	73.76^{x}
$I_1 \times B_1 \times N_0$	118.21^{a-i}	24.08^{b-g}	95.44^{c-g}	19.47^{e-h}	373.19^{p-t}	75.91^{s-x}
$I_1 \times B_2 \times N_0$	115.71^{c-l}	23.09^{d-j}	94.07^{c-i}	18.8^{f-h}	385.59^{o-r}	76.9^{q-v}
$I_1 \times B_3 \times N_0$	106.91^{k-q}	21.06^{i-q}	86.69^{j-o}	17.08^{i-o}	400.89^{m-p}	78.93^{i-q}
$I_1 \times B_0 \times N_1$	120.78^{a-f}	24.77^{b-e}	97.52^{a-e}	20.02^{d-f}	367.52^{q-u}	75.22^{u-x}
$I_1 \times B_1 \times N_1$	113.61^{e-n}	21.56^{h-o}	93.02^{d-j}	17.67^{i-m}	413.07^{k-o}	78.43^{k-r}
$I_1 \times B_2 \times N_1$	116.19^{c-k}	22.35^{f-l}	95.88^{c-g}	18.47^{f-j}	403.83^{l-p}	77.64^{n-t}
$I_1 \times B_3 \times N_1$	106.38^{l-r}	19.17^{p-v}	89.65^{g-l}	16.16^{l-q}	448.47^{f-j}	80.83^{d-i}
$I_1 \times B_0 \times N_2$	116.89^{c-j}	23.62^{c-h}	91.09^{e-k}	18.36^{f-j}	379.27^{p-r}	76.38^{r-w}
$I_1 \times B_1 \times N_2$	113.61^{e-n}	22.55^{e-k}	94.55^{c-h}	18.47^{f-j}	398.18^{n-q}	77.44^{o-u}
$I_1 \times B_2 \times N_2$	111.86^{f-o}	20.99^{i-q}	89.88^{f-l}	16.86^{j-o}	421.11^{j-n}	79^{i-q}
$I_1 \times B_3 \times N_2$	113.31^{e-n}	20.75^{j-q}	91.36^{e-k}	16.73^{j-q}	432.99^{i-l}	79.24^{i-p}
$I_1 \times B_0 \times N_3$	116.77^{c-j}	22.69^{e-k}	92.6^{d-j}	17.98^{g-k}	398.31^{n-q}	77.3^{o-u}
$I_1 \times B_1 \times N_3$	111.14^{g-p}	19.73^{m-t}	89.24^{g-m}	15.84^{n-q}	451.98^{f-j}	80.26^{f-m}
$I_1 \times B_2 \times N_3$	104.9^{n-s}	19.57^{m-u}	85.27^{k-p}	15.92^{m-q}	430.87^{i-m}	80.42^{e-m}
$I_1 \times B_3 \times N_3$	100.28^{q-t}	17.4^{t-y}	81.6^{n-q}	14.16^{q-t}	475.7^{b-f}	82.59^{a-e}
$I_2 \times B_0 \times N_0$	127.7^{a}	30.28^{a}	104.51^{a}	24.82^{a}	294.34^{x}	69.71^{y}
$I_2 \times B_1 \times N_0$	124.79^{a-c}	25.59^{bc}	101.23^{a-c}	22.54^{bc}	334.85^{vw}	74.41^{wx}
$I_2 \times B_2 \times N_0$	110.93^{g-p}	23.62^{c-h}	87.94^{h-n}	18.71^{f-i}	368.45^{q-u}	76.37^{r-w}
$I_2 \times B_3 \times N_0$	118.69^{a-h}	26.15^{b}	95.47^{c-g}	21.06^{c-e}	336.09^{vw}	73.84^{x}
$I_2 \times B_0 \times N_1$	126.55^{ab}	28.82^{a}	103.29^{ab}	23.58^{ab}	312.86^{wx}	71.17^{y}
$I_2 \times B_1 \times N_1$	118.07^{b-i}	24.52^{b-f}	100.36^{a-c}	20.95^{c-e}	362.02^{r-v}	75.47^{t-x}
$I_2 \times B_2 \times N_1$	121.01^{a-f}	26.19^{b}	97.07^{b-f}	21.03^{c-e}	342.06^{t-w}	73.8^{x}
$I_2 \times B_3 \times N_1$	114.17^{d-n}	23.18^{d-i}	91.92^{e-k}	18.67^{f-i}	379.16^{p-r}	76.81^{q-u}
$I_2 \times B_0 \times N_2$	108.84^{i-q}	24.37^{b-f}	87.23^{i-n}	19.56^{e-g}	335.84^{vw}	75.62^{t-x}
$I_2 \times B_1 \times N_2$	122.65^{a-e}	26.35^{b}	99.74^{a-d}	21.46^{cd}	343.63^{s-w}	73.64^{x}
$I_2 \times B_2 \times N_2$	120.23^{a-g}	25.32^{b-d}	99.26^{a-d}	20.97^{c-e}	355.15^{r-v}	74.67^{v-x}
$I_2 \times B_3 \times N_2$	110.11^{h-p}	21.52^{h-p}	91.6^{e-k}	17.93^{g-l}	401.27^{m-p}	78.47^{j-r}
$I_2 \times B_0 \times N_3$	118.52^{a-h}	25.83^{bc}	95.41^{c-g}	20.8^{c-e}	339.74^{u-w}	74.16^{wx}
$I_2 \times B_1 \times N_3$	115.29^{c-l}	23.61^{c-h}	90.46^{e-l}	18.5^{f-j}	374.26^{p-s}	76.38^{r-w}
$I_2 \times B_2 \times N_3$	114.06^{d-n}	21.77^{g-m}	90.94^{e-k}	17.67^{h-l}	402.15^{l-p}	78.22^{m-s}
$I_2 \times B_3 \times N_3$	105.22^{m-s}	19.38^{n-v}	85.14^{k-n}	15.68^{o-r}	437.49^{h-k}	80.61^{d-l}
LSD 0.05	9.56	2.38	7.2	1.79	31.31	2.38

I_0، I_1 و I_2 به‌ترتیب آبیاری کامل، قطع آبیاری در مرحله سنبله‌دهی و آبستنی. B_0، B_1، B_2 و B_3 به‌ترتیب عدم کاربرد کودهای زیستی، کاربرد *سودوموناس*، کاربرد *آزوسپریلوم* و کاربرد توام *سودوموناس* و *آزوسپریلوم*. N_0، N_1، N_2 و N_3 به‌ترتیب عدم محلول‌پاشی، محلول‌پاشی نانواکسید آهن و محلول‌پاشی نانوسیلیکون. میانگین‌های با حروف مشابه در هر ستون اختلاف آماری معنی‌داری بر اساس آزمون LSD در سطح احتمال پنج درصد با هم ندارند.

I_0, I_1, and I_2: full irrigation, irrigation withholding at heading and booting stages respectively. B_0, B_1, B_2, and B_3 are no application of biofertilizers, application of pseudomonas, azosprilium, application azosprilium + pseudomonas. N_0, N_1, and N_2 are no foliar application, nano iron oxide foliar application, nano silicon, nano iron-silicon foliar application.

Means with similar letters in each column are not significantly different based on the LSD test at the 0.05 probability level.

حجم و وزن ریشه

نتایج تجزیه واریانس نشان داد اثر سطوح آبیاری، باکتری‌های محرک رشد و نانوذرات بر حجم ریشه در سطح احتمال یک درصد و اثر ترکیب تیماری باکتری‌های محرک رشد و نانوذرات بر وزن ریشه در سطح احتمال پنج درصد معنی‌دار شد (جدول ۶). مقایسه میانگین‌ها نشان داد که کاربرد توأم باکتری‌های محرک رشد و نانوذرات در شرایط آبیاری کامل موجب افزایش ۶۳/۹۶ درصدی حجم ریشه نسبت به شرایط عدم کاربرد باکتری‌های محرک رشد و نانوذرات تحت شرایط قطع آبیاری در مرحله آبستنی شد (جدول ۷). مقایسه میانگین اثرات ترکیب تیماری نشان داد که کاربرد باکتری‌های محرک رشد و نانوذرات بیشترین وزن خشک ریشه (۴۵۱/۶۴ گرم در مترمربع) را به خود اختصاص داده و از افزایش ۴۱/۴۹ درصدی وزن ریشه نسبت به عدم کاربرد توام باکتری‌های رشد و نانوذرات برخوردار بود (جدول ۸). به نظر می‌رسد افزایش محدودیت آبی موجب محدود شدن ترکیباتی مانند سیتوکینین‌ها و افزایش تولید ترکیباتی مانند آبسیزیک اسید می‌شود که منجر به توقف تقسیم سلولی و رشد ریشه می‌شود. همچنین گزارش شده است که محدودیت آبی با کاهش فتوسنتز، کاهش انتقال مواد فتوسنتزی و تقسیم سلولی و همچنین افزایش احتیاجات قندی برای تنظیم اسمزی در گیاه، موجب توقف رشد ریشه و در نهایت کاهش وزن ریشه می‌شود (Sharifani, Farhadi, Alizade, Hokmabadi, & Aliniaeifard, 2021).

افزایش سطح ریشه‌ها از طریق افزایش سطح جذب آب و عناصر غذایی می‌تواند کارآیی جذب آب و عناصر غذایی را افزایش دهد. ازاین رو کاربرد باکتری‌های محرک رشد، با تغییر معماری ریشه به نفع گسترش طول و افزایش سطح ریشه، موجب افزایش جذب آب توسط ریشه گیاه می‌شوند. همچنین، تغییرات فیتوهورمونی ناشی از تلقیح باکتری‌های محرک رشد موجب افزایش تعداد ریشه‌های جانبی و ریشه‌های موئین و همچنین افزایش سطح، وزن خشک و طول ریشه و فراهمی بیشتر آب و عناصر غذایی می‌شود (Karimi, Alisgharzad, Mousavi, & Aliloo, 2022). به‌نظر می‌رسد بخشی از بهبود وزن و حجم ریشه به واسطه کاربرد باکتری‌های محرک رشد می‌توان به اثرات ناشی از تاثیر این باکتری ها در افزایش فراهمی و جذب عناصر غذایی و بهبود فتوسنتز جاری (جدول ۵) نسبت داد، که مطابق با یافته‌های محمدی کله‌سرلو و همکاران (Mohammadi Kale Sarlou *et al*., 2023) بود. بخش دیگری از افزایش وزن و حجم ریشه به‌واسطه نانوذرات را می‌توان به اثر این مواد در گسترش شاخص سطح برگ و بهبود فتوسنتز نسبت داد. در این راستا نظری و همکاران (Nazari *et al*., 2022) اظهار داشتند که محلول‌پاشی نانواکسید آهن و سیلیکون با بهبود فتوسنتز و انتقال مواد فتوسنتزی به ریشه، ضمن بهبود رشد گیاه موجب افزایش وزن و حجم ریشه گیاه گندم شد.

جدول ٦- تجزیه واریانس تاثیر باکتری‌های محرک رشد و نانوذرات بر حجم و وزن خشک ریشه، شاخص سطح برگ و عملکرد دانه تریتیکاله در سطوح مختلف آبیاری

Table 6- Analysis of variance of the effects of PGPR and nanoparticles on volume and root dry weight, leaf area index (LAI), and grain yield of triticale under different levels of irrigation

منابع تغییرات Source of variation	درجه آزادی d.f	میانگین مربعات (Mean Square)			
		وزن خشک ریشه Root dry weigh	حجم ریشه Root volume	شاخص سطح برگ LAI	عملکرد دانه Grain yield
تکرار (R) Replication	2	82149.18**	332751.46**	1.095**	9294.9*
آبیاری Irrigation (I)	2	70298.18**	232025.18**	4.488**	52308.47**
خطای اصلیError a		2757.31	1410.15	0.04	5032.62
کودهای زیستی Bio fertilizers (B)	3	49457.03**	109152.5**	1.804**	5558.4**
نانوذرات nanoparticles (N)	3	14223.76**	45081.75**	0.968**	8358.02**
I×B	6	1027.76ns	2807.92ns	0.293**	2324.67**
I×N	6	1281.96ns	2569.18ns	0.144**	1610.9*
B×N	9	2328.18**	4883.44**	0.16**	2495.99**
I×B×N	18	1132.85ns	5250.22**	0.173**	2383.89**
خطای فرعیError b	90	953.54	2078.39	0.04	574.28
ضریب تغییرات (%) CV	-	8.1	7.0	6.0	4.5

ns، * و ** به‌ترتیب غیرمعنی‌دار و معنی‌دار در سطح احتمال پنج و یک درصد.

ns, * and ** are non-significant, significant at P≤0.05 and P≤0.01, respectively.

جدول ۷- مقایسه میانگین تاثیر باکتری‌های محرک رشد و نانوذرات بر حجم ریشه، شاخص سطح برگ و عملکرد دانه تریتیکاله در سطوح مختلف آبیاری

Table 7- Means comparison of the effects of PGPR and nanoparticles on volume root, LAI, and grain yield of triticale under different levels of irrigation

ترکیب تیماری Treatments	حجم ریشه Root volume ($cm^3.m^{-2}$)	شاخص سطح برگ LAI	عملکرد دانه Grain yield ($g.m^{-2}$)
$I_0\times B_0\times N_0$	648.33^{i-m}	3.36^{h-l}	528.8^{m-r}
$I_0\times B_1\times N_0$	630.5^{j-p}	3.68^{d-h}	564.58^{g-i}
$I_0\times B_2\times N_0$	642.33^{i-n}	2.96^{o-r}	539.35^{k-o}
$I_0\times B_3\times N_0$	762^{a-d}	3.9^{a-d}	570.1^{e-h}
$I_0\times B_0\times N_1$	562.33^{o-u}	3.44^{f-k}	550.25^{i-l}
$I_0\times B_1\times N_1$	760^{a-d}	3.9^{a-e}	586^{b-e}
$I_0\times B_2\times N_1$	733^{a-g}	2.72^{q-s}	578.55^{c-g}
$I_0\times B_3\times N_1$	793.5^{ab}	4.06^{ab}	588.81^{a-d}
$I_0\times B_0\times N_2$	673.67^{f-k}	3.49^{f-k}	562.56^{g-j}
$I_0\times B_1\times N_2$	763.17^{a-d}	3.9^{a-e}	566.76^{f-i}
$I_0\times B_2\times N_2$	762.17^{a-d}	3.9^{a-d}	583.15^{b-f}
$I_0\times B_3\times N_2$	787.33^{ab}	4.03^{a-c}	593.76^{a-c}
$I_0\times B_0\times N_3$	693^{d-j}	3.58^{e-j}	573.3^{d-g}
$I_0\times B_1\times N_3$	764.33^{a-d}	3.9^{a-e}	596.96^{ab}
$I_0\times B_2\times N_3$	782.67^{a-c}	4^{a-c}	590.43^{a-d}
$I_0\times B_3\times N_3$	805.33^{a}	4.14^{a}	604.73^{a}
$I_1\times B_0\times N_0$	536.5^{r-u}	2.82^{p-s}	470.73^{a-c}
$I_1\times B_1\times N_0$	558.83^{p-u}	2.95^{o-s}	491.4^{w-z}
$I_1\times B_2\times N_0$	558.5^{p-u}	2.98^{n-r}	501.3^{u-x}
$I_1\times B_3\times N_0$	647.17^{i-m}	3.35^{i-m}	507.8^{s-w}
$I_1\times B_0\times N_1$	564.83^{o-t}	2.98^{n-r}	488.3^{x-a}
$I_1\times B_1\times N_1$	649.17^{i-m}	3.37^{h-l}	526.68^{n-r}
$I_1\times B_2\times N_1$	680.83^{e-k}	3.48^{f-k}	520.01^{p-t}
$I_1\times B_3\times N_1$	733.5^{a-f}	3.75^{b-f}	554.85^{h-k}
$I_1\times B_0\times N_2$	570.83^{n-t}	3.03^{m-q}	496.16^{v-y}
$I_1\times B_1\times N_2$	680^{e-k}	3.46^{f-k}	523.48^{o-s}
$I_1\times B_2\times N_2$	633.83^{j-o}	3.3^{j-n}	532.96^{l-q}
$I_1\times B_3\times N_2$	729.5^{b-h}	3.73^{c-g}	546.3^{j-m}
$I_1\times B_0\times N_3$	581.33^{m-s}	3.07^{l-p}	515.08^{q-u}
$I_1\times B_1\times N_3$	678.33^{f-k}	3.46^{f-k}	563.11^{g-j}
$I_1\times B_2\times N_3$	671^{f-l}	3.67^{d-i}	535.76^{l-p}
$I_1\times B_3\times N_3$	753.33^{a-e}	3.85^{a-e}	575.98^{c-g}
$I_2\times B_0\times N_0$	491.17^{u}	2.62^{s}	422.05^{i}
$I_2\times B_1\times N_0$	506.5^{tu}	2.69^{rs}	450.71^{e-h}
$I_2\times B_2\times N_0$	659.33^{h-l}	3.38^{h-l}	435.86^{hi}
$I_2\times B_3\times N_0$	562.17^{o-u}	2.96^{o-r}	454.78^{d-g}
$I_2\times B_0\times N_1$	512.67^{s-u}	3.42^{g-k}	439.41^{g-i}
$I_2\times B_1\times N_1$	570.5^{n-t}	3.01^{n-r}	480.1^{y-b}
$I_2\times B_2\times N_1$	547.33^{q-u}	2.87^{p-s}	463.06^{b-e}
$I_2\times B_3\times N_1$	660^{g-l}	3.39^{h-l}	493.33^{v-z}
$I_2\times B_0\times N_2$	617.67^{k-q}	3.01^{n-r}	444.68^{f-h}
$I_2\times B_1\times N_2$	566.17^{o-t}	2.99^{n-r}	466.28^{b-e}
$I_2\times B_2\times N_2$	548.17^{q-u}	2.9^{o-s}	475.38^{z-c}
$I_2\times B_3\times N_2$	657^{h-l}	3.37^{h-l}	511.38^{r-v}
$I_2\times B_0\times N_3$	534.17^{r-u}	2.81^{p-s}	458.26^{x-z}
$I_2\times B_1\times N_3$	599.17^{l-r}	3.09^{l-p}	489.55^{x-z}
$I_2\times B_2\times N_3$	612.33^{k-q}	3.22^{k-o}	504.51^{t-x}
$I_2\times B_3\times N_3$	710.67^{c-i}	3.48^{f-k}	542.71^{k-n}
LSD 0.05	73.4	0.326	18.15

I_0، I_1 و I_2 به‌ترتیب آبیاری کامل، قطع آبیاری در مرحله سنبله‌دهی و آبستنی. B_0، B_1، B_2 و B_3 به‌ترتیب عدم کاربرد کودهای زیستی، کاربرد *سودوموناس*، کاربرد *آزوسپریلوم* و کاربرد توام *سودوموناس* و *آزوسپریلوم*. N_0، N_1، N_2 و N_3 به‌ترتیب عدم محلول‌پاشی، محلول‌پاشی نانواکسید آهن و محلول‌پاشی نانوسیلیکون. میانگین‌های با حروف مشابه در هر ستون اختلاف آماری معنی‌داری بر اساس آزمون LSD در سطح احتمال پنج درصد با هم ندارند.

I_0, I_1, and I_2: full irrigation, irrigation withholding at heading and booting stages respectively. B_0, B_1, B_2, and B_3 are no application of biofertilizers, application of pseudomonas, azosprilium, application azosprilium + pseudomonas. N_0, N_1, and N_2 are no foliar application, nano iron oxide foliar application, nano silicon, nano iron-silicon foliar application.

Means with similar letters in each column are not significantly different based on the LSD test at the 0.05 probability level.

جدول ۸- مقایسه میانگین تاثیر باکتری‌های محرک رشد و نانوذرات بر وزن خشک ریشه تریتیکاله

Table 8- Means comparison of the effects of PGPR and nanoparticles on Root dry weigh of triticale

Treatments تیمارها	Nanoparticles نانوذرات			
باکتری‌های محرک رشد PGPR	Root dry weigh وزن خشک ریشه ($g.m^2$)			
	N_0	N_1	N_2	N_3
B_0	319.19^{h}	323.42^{h}	353.68^{e-h}	349.31^{f-h}
B_1	329.22^{gh}	384.56^{c-f}	382.49^{c-f}	411.01^{a-c}
B_2	383.24^{c-f}	367.42^{d-g}	399.89^{b-d}	406.95^{b-d}
B_3	395.68^{b-e}	435.25^{ab}	422.55^{a-c}	451.64^{a}
LSD	43.32			

B_0، B_1، B_2 و B_3 به‌ترتیب عدم کاربرد کودهای زیستی، کاربرد *سودوموناس*، کاربرد *آزوسپریلوم* و کاربرد توام *سودوموناس* و *آزوسپریلوم*. N_0، N_1، N_2 و N_3 به‌ترتیب عدم محلول‌پاشی، محلول‌پاشی نانواکسید آهن و محلول‌پاشی نانوسیلیکون، کاربرد توام محلول‌پاشی نانواکسید آهن و نانوسیلیکون.

میانگین‌های با حروف مشابه در هر ستون اختلاف آماری معنی‌داری بر اساس آزمون LSD در سطح احتمال پنج درصد با هم ندارند.

B_0, B_1, B_2, and B_3 are no application of biofertilizers, application of pseudomonas, azosprilium, application azosprilium + pseudomonas. N_0, N_1, and N_2 are no foliar application, nano iron oxide foliar application, nano silicon, nano iron-silicon foliar application. Means with similar letters in each column are not significantly different based on the LSD test at the 0.05 probability level.

عملکرد تک بوته

نتایج تجزیه واریانس نشان داد اثر سطوح آبیاری، باکتری‌های محرک رشد و نانوذرات بر عملکرد تک‌بوته در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار شد (جدول ۶). مقایسه میانگین‌ها نشان داد بیشترین عملکرد دانه از کاربرد توأم باکتری‌های محرک رشد و نانوذرات در شرایط آبیاری کامل به‌دست آمد. از طرفی عدم کاربرد باکتری‌های محرک رشد و نانوذرات در شرایط قطع آبیاری در مرحله آبستنی، موجب کاهش ۲۸/۵۸ درصدی عملکرد دانه نسبت به کاربرد توأم باکتری‌های محرک رشد و نانوذرات در این سطح از آبیاری شد (جدول ۷). به‌نظر می‌رسد در شرایط محدودیت آبی دلیل اصلی کاهش عملکرد دانه، کاهش سرعت فتوسنتز و پیری سریع برگ‌ها (کاهش قدرت منبع) و کاهش قدرت مخزن باشد (Salehi, Ahmadi, Mirabzadeh, & Rafei, 2020). محققین دیگر نیز بیان کردند کمبود آب در گیاه موجب کاهش وزن و حجم ریشه می‌شود که در ادامه با کاهش فتوسنتز جاری و انتقال مواد به دانه‌ها، موجب کاهش عملکرد دانه می‌شود (Narimani *et al.*, 2022). همچنین در شرایط کمبود آب، باکتری‌های محرک رشد از طریق اثر بر فعالیت ریشه و افزایش سطح جذب آب، به دلیل بهبود شاخص سطح برگ (جدول ۷) و در نتیجه جذب بهتر تشعشع، افزایش فتوسنتز گیاه و تخصیص مواد فتوسنتزی به بخش‌های هوایی و زیرزمینی گیاه را به همراه داشت که به نوبه خود موجب افزایش وزن حجم ریشه شد. نتایج مشابهی نیز توسط دیگر محققان گزارش شده است (Mindani, Khani, Jalali Honarmand, & Saeedi, 2020). عباسی و همکاران (Abbasi *et al.*, 2021) نیز افزایش عملکرد دانه به‌واسطه‌ی باکتری‌های محرک رشد گیاه را به رشد و توسعه بهتر ریشه و به تبع از آن در افزایش رشد سیستم ریشه‌ای گیاه در جذب عناصر غذایی مانند نیتروژن نسبت دادند. همچنین بخشی از اثر سودمند کاربرد نانوذرات بر عملکرد دانه را می‌توان به افزایش شاخص سطح برگ (جدول ۷) و حجم و وزن ریشه (جدول ۷ و ۸) نسبت داد. برخی محققین نیز افزایش عملکرد دانه گندم به‌واسطه محلول‌پاشی نانو آهن و سیلیکون را به بهبود شاخص سطح برگ و فتوسنتز جاری نسبت دادند که موجب افزایش وزن و حجم ریشه شد (Nazari *et al.*, 2022). در این بررسی نیز به‌نظر می‌رسد کاربرد توأم باکتری‌های محرک رشد و نانوذرات با افزایش شاخص سطح برگ (جدول ۷)، وزن خشک و حجم ریشه (جدول ۷ و ۸) و میزان فتوسنتز جاری (جدول ۵) موجب افزایش عملکرد دانه (جدول ۷) تریتیکاله شد.

نتیجه‌گیری

پژوهش حاضر نشان داد که در شرایط محدودیت آبی، حضور باکتری‌های محرک رشد و نانوذرات (نانواکسید آهن ونانوسیلیکون) به‌صورت توأم و منفرد نقش چشمگیری در بهبود شاخص سطح برگ، بیوماس کل، حجم و وزن ریشه، عملکرد دانه و فتوسنتز جاری داشت. محدودیت آبی موجب افزایش میزان انتقال مجدد ماده خشک از کل بوته و ساقه گردید. به‌نظر می‌رسد برای کاهش اثر منفی محدودیت آبی و بهبود عملکرد دانه تریتیکاله تلقیح بذر با باکتری‌های محرک رشد و محلول‌پاشی نانوذرات (نانواکسید آهن و نانوسیلیکون) می‌تواند مفید باشد.

References

1. Abbasi, A., Mehri, Sh., Solimanzadeha, H., & Alipourb, S. (2021). Investigation the effect of plant growth

promoting rhizobacteria on growth, yield and dry matter remobilization in barley. *Journal of Plant Ecophysiology*, *13*(47), 1-16. (in Persian with English abstract).
2. Abdelaal, K., AlKahtani, M., Attia, K., Hafez, Y., Király, L., & Künstler, A. (2021). The rle of pant growth-promoting bacteria in alleviating the adverse effects of drought on plants. *Biology*, *10*, 520. https://doi.org/10.3390/biology10060520
3. Barnett, K. H., & Pearce, P. B. (1983). Source-sink ratio alteration and its effect on physiological parameters in maize. *Crop Science*, *23*(2), 101-109. https://doi.org/10.2135/cropsci1983.0011183X002300020028x
4. Brunetti, C., Saleem, A. R., Della Rocca, G., Emiliani, G., De Carlo, A., Balestrini, R., Khalid, A., & Mahmood, T. (2021). Effects of plant growth-promoting rhizobacteria strains producing ACC deaminase on photosynthesis, isoprene emission, ethylene formation and growth of *Mucuna pruriens* (L.) DC. in response to water deficit. *Journal of Biotechnology*, *331*, 53-62. https://doi.org/10.1016/j.jbiotec.2021.03.008
5. Chieb, M., & Gachomo, E. W. (2023). The role of plant growth promoting rhizobacteria in plant drought stress responses. *Chieb and Gachomo BMC Plant Biology*, *23*, 407. https://doi.org/10.1186/s12870-023-04403-8
6. Desoky, E. S. M., Mansour, E., Yasin, M. A., El Sobky, E. S. E., & Rady, M. M. (2020). Improvement of drought tolerance in five different cultivars of *Vicia faba* with foliar application of ascorbic acid or silicon. Span. *Journal of Agricultural Research*, *18*, 16. https://doi.org/10.5424/sjar/2020182-16122
7. Ebadi, N., Seyed Sharifi, R., & Narimani, H. (2020). Effects of supplementary irrigation and biofertilizers on grain yield, dry matter remobilization and some physiological traits of barley (*Hordeum vulgare* L.) under rainfed conditions. *Journal of Crop Production and Processing*, *10*(2), 123-135. (in Persian with English abstract). https://doi.org/10.47176/jcpp.10.2.25857
8. Kapoor, D., Bhardwaj, S., Landi, M., Sharma, A., Ramakrishnan, M., & Sharma, A. (2020). The ipact of drought in pant mtabolism: how to exploit tolerance mechanisms to increase crop production. *Applied Sciences*, *10*, 5692: 1-19. https://doi.org/10.3390/app10165692
9. Karimi, E., Alisgharzad, N., Mousavi, S. B., & Aliloo, A. (2022). The effect of growth promoting bacteria on barley yield and morphological root characteristics under different water conditions. *Journal of Soil and Plant Interactions*, *13*(2), 67-81. (in Persian). https://doi.org/10.47176/jspi.13.2.20531
10. Khan, Z. S., Rizwan, M., Hafeez, M., Ali, Sh., Adrees, M., Farooq Qayyum, M., Khalid, S., Zia Ur Rehman, M., & Aleem Sarwar, M. (2020). Efects of silicon nanoparticles on growth and physiology of wheat in cadmium contaminated soil under diferent soil moisture levels. *Environmental Science and Pollution Research*, *27*, 4958-4968. https://doi.org/10.1007/s11356-019-06673-y
11. Kheirizadeh Arough, Y. (2016). Effects of nano zinc oxide foliar application, arbuscular mycorrhizal fungus and free living nitrogen fixing bacteria on yield and some physiological traits of Triticale under salinity and water limitation condition. Ph.D thesis, University of Mohaghegh Ardabili, Iran.
12. Kreslavskia, V. D., Shmarev, A. N., IvanovA, A. A., Zharmukhamedov, S. K., Strokina, V., Kosobryukhov, A., Yu, M., Allakhverdiev, S. I., & Shabala, S. (2023). Effects of iron oxide nanoparticles (Fe_3O_4) and salinity on growth, photosynthesis, antioxidant activity and distribution of mineral elements in wheat (*Triticum aestivum*). *Functional Plant Biology*. https://doi.org/10.1071/fp23085
13. Liu, Y., Zhang, P., Li, M., Chang, L., Cheng, H., Chai, S., & Yang, D. (2020). Dynamic responses of accumulation and remobilization of water-soluble carbohydrates in wheat stem to drought stress. *Plant Physiology and Biochemistry*, *155*, 262-270. https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2020.07.024
14. Mindani, F., Khani, K., Jalali Honarmand, S., & Saeedi, M. (2020). Studying effect of plant growth-promoting rhizobacteria on ecophysiological traits of soybean (*Glycine max* L.) under irrigation regimes. *Journal of Agroecology*, *11*(4). (in Persian with English abstract). https://doi.org/10.22067/jag.v11i4.73655
15. Mohammadi Kale Sarlou, S., Seyed Sharifi, R., Narimani, H., & Nazari, Z. (2023). Effect of flavobacterim, vermicompost and humic acid on current photosynthesis, dry matter remobilization and their contribution in grain yield of triticale under salinity stress conditions. *Journal of Plant Environmental Physiology*, *69*(1), 26-43. (in Persian with English abstract). https://doi.org/10.30495/iper.2022.690242
16. Narimani, H., Seyed Sharifi, R., Khalilzadeh, R., & Aminzadeh, G. (2019). Effect of supplemental irrigation and nano iron oxide on chlorophyll content and filling components of wheat (*Triticunm aestivum* L.) under rainfed conditions. *Environmental Stresses in Crop Sciences* *12*(3): 735-746. (In Persian).
17. Narimani, H., Seyed Sharifi, R., & Sedghi, M. (2022). Effect of biofertilizer and putrescine application on grain filling components and dry matter remobilization of triticale (*Triticosecale Wittmack*) under water limitation conditions. *Cereal Research*, *11*(4), 359-373. (in Persian with English abstract). https://doi.org/10.22124/cr.2022.22374.1726
18. Nazari, G., Sedgi, M., & Narimani, H. (2022). Effect of salinity and application of humic acid, iron and silicon nanoxide on the contribution of remobilization process and current photosynthesis in wheat grain yield. *Crop Physiology Journal*, *14*(54), 5-25. (in Persian).
19. Rady, M. M., Elrys, A. S., El-Maati, M. F. A., & Desoky, E. S. M. (2019). Interplaying roles of silicon and proline effectively improve salt and cadmium stress tolerance in Phaseolus vulgaris plant. *Plant Physiology and*

Biochemistry, *139*, 558-568. https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2019.04.025

20. Rajput, V. D., Minkina, T., Feizi, M., Kumari, A., Khan, M., Mandzhieva, S., Sushkova, S., El-Ramady, H., Verma, K. K., Singh, A., et al. (2021). Effects of silicon and silicon-based nanoparticles on rhizosphere microbiome, plant stress and growth. *Biology*, *10*, 791. https://doi.org/10.3390/biology10080791
21. Rasheed, A., Li, H., Tahir, M. M., Mahmood, A., Nawaz, M., Shah, A. N., Aslam, M. T., Negm, S., Moustafa, M., Hassan, M.U., & Wu, Z. (2022). The role of nanoparticles in plant biochemical, physiological, and molecular responses under drought stress: A review. *Frontiers in Plant Science*, *13*, 976179. https://doi.org/10.3389/fpls.2022.976179
22. Rezabeighi, S., Bijanzadeh, E., & Behpouri, A. (2020). Effect of silicone spraying on assimilate remobilization and yield of two bread and durum wheat under late season water stress. *Journal of Plant Production*, *27*(3), 55-71. (in Persian). https://doi.org/10.22069/jopp.2020.16384.2491
23. Rizwan, M., Ali, Sh., Ali, B., Adrees, M., Arshad, M., Hussain, A., Zia Ur Rehman, M., & Waris, A. A. (2019). Zinc and iron oxide nanoparticles improved the plant growth and reduced the oxidative stress and cadmium concentration in wheat. *Chemosphere*, *214*, 269-277. https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2018.09.120
24. Safi, S. N., Moshatati, A., Gharineh, M. H., & Khodaei Joghan, A. (2022). The effect of sugarcane residue compost on growth and grain yield of triticale under drought stress. *Plant Productions*, *45*(2), 253-266. (in Persian with English abstract). https://doi.org/10.22055/ppd.2021.36017.1961
25. Saleemi, M., Kiani, M. Z., Sultan, T., Khalid, A., & Mahmood, S. (2017). Integrated effect of plant growth-promoting rhizobacteria and phosphatesolubilizing microorganisms on growth of wheat (*Triticum aestivum* L.) under rainfed condition. *Agriculture and Food Security*, *6*, 46. https://agricultureandfoodsecurity.biomedcentral.com/articles/10.1186/s40066-017-0123-7
26. Salehi, F., Ahmadi, A., Mirabzadeh, M., & Rafei, H. R. (2020). Evaluation of storage and remobilization of stem dry matter of three wheat cultivars under different moisture regimes in before and after flowering stages. *Iranian Journal of Field Crop Science*, *51*(1), 35-49. (in Persian with English abstract). https://doi.org/10.22059/ijfcs.2018.227966.654279
27. Seyed Sharifi, R., & Gholinejad, E. (2021). Evaluation of agronomic and morphophysiological traits of crops. Mohaghegh Ardabili university press. Number page 410.
28. Sharifani, M. M., Farhadi, H., Alizade, M., Hokmabadi, H., & Aliniaeifard, S. (2021). Evaluation of chlorophyll fluorescence changes, the amount of biomass of the rootstocks and interspecific hybrids of the genus pistachios (P. *Vera* × P. *integerrima*) in order to achieve drought tolerant rootstocks. *Pomology Research Scientific Journal*, *5*(2), 155-171. (in Persian with English abstract).
29. Ur Rehman, M. M., Zhu, Y., Abrar, M., Khan, W., Iqbal, A., Khan, A., Chen, Y., Rafiq, M., Tufail, M. A., Ye, J., & Xiong, Y. (2022). Moisture- and period-dependent interactive effects of plant growth-promoting rhizobacteria and AM fungus on water use and yield formation in dryland wheat. *Plant and Soil*, *6*, 1-25. https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-1516690/v1
30. Yuan, Y., Zu, M., Sun, L., & Zuo, J. (2022). Isolation and screening of 1-aminocyclopropane-1-carboxylic acid (ACC) deaminase producing PGPR from Paeonia lactiflora rhizosphere and enhancement of plant growth. *Scientia Horticulturae*, *297*, 110956. https://doi.org/10.1016/j.scienta.2022.110956